



TITLE:

トポロジカル絶縁体における非平衡キャリアダイナミクス(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

大西, 義人

CITATION:

大西, 義人. トポロジカル絶縁体における非平衡キャリアダイナミクス. 京都大学, 2015, 博士(理学)

ISSUE DATE:

2015-05-25

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k19167>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開; 許諾条件により要旨は2015-06-01に公開

京都大学	博 士（理 学）	氏名	大西 義人
論文題目	トポロジカル絶縁体における非平衡キャリアダイナミクス		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>3次元トポロジカル絶縁体では、バルク電子状態における非自明なトポロジーの帰結として、エネルギーギャップ内に分散関係がDirac方程式に従う表面電子状態が出現し、そのスピン状態が運動方向によって決定されることが知られている。この興味深い物性のため、その輸送特性や外場応答が広く注目を集めている。このようなキャリアの輸送特性を理解するためには、非平衡キャリアのダイナミクスを明らかにすることが重要となる。さらに、光励起されたDirac電子系は電磁場と相互作用する相対論的粒子の非平衡ダイナミクスを明らかにするための格好の舞台をあたえる。</p> <p>本論文では、3次元トポロジカル絶縁体における光励起キャリアの非平衡ダイナミクスを明らかにするために、Bi_{1.5}Sb_{0.5}Te_{1.7}Se_{1.3}において二種類の時間分解光学測定を行った。まず、ピコ秒の時間スケールで光電流の過渡特性を明らかにするために、テラヘルツ放射分光測定を行った。テラヘルツ放射分光測定はフェムト秒パルス励起によって生成した過渡電流を測定し、固体中の電流のダイナミクスを理解することができる強力な手法である。本論文では、テラヘルツ電磁放射に励起偏光方向に依存した成分が含まれることを明らかにした。この成分の結晶方位角依存性・励起光強度依存性・入射角依存性の結果に基づいて、テンソル解析と時間波形の解析を行うことによって、光照射により3次元トポロジカル絶縁体中にphoton drag 電流が即時的に誘起されることが明らかにした。</p> <p>次に、光励起直後に形成される非平衡電子分布の有効温度が光励起の余剰エネルギーによるものか、Auger再結合によるものかを明らかにするために、バンド端近傍のキャリア緩和ダイナミクスを調べた。過去の研究では、光子エネルギー（1.5 eV）の励起光が用いられてきたが、この場合の非平衡電子分布の主な原因は光から電子系に供給される余剰エネルギーであった。本研究では余剰エネルギーを抑えるために、中赤外域での光励起を行い、過渡的な反射率変化の測定を行った。励起キャリア密度に対して非線形な依存性が観測され、レート方程式を用いた定量的な解析を行うことにより、10¹⁸ cm⁻³よりも高いキャリア密度での主要な原因がAuger再結合であることを明らかにした。</p> <p>本研究では、以上の二種類の時間分解光学測定の結果に基づき、3次元トポロジカル絶縁体における超高速キャリアダイナミクスについて以下のモデルを提案している。光励起後の初期過程では、コヒーレントにphoton drag 電流が誘起されるが、運動量緩和過程によって即時的に緩和し、その結果として熱平衡化した高温の非平衡電子分布が出現する。この電子分布の有効温度は数ピコ秒以内に格子温度へと冷却される。その冷却過程のあと、バンド間遷移過程によってキャリア密度が減少するが、10¹⁸ cm⁻³よりも励起キャリア密度が高いときにはAuger再結合過程が重要となる。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は3次元トポロジカル絶縁体における光励起キャリアの生成から緩和に至る一連のピコ秒領域の実時間ダイナミクスを詳細に調べた実験的研究である。非平衡キャリアのダイナミクスについての系統的な時間分解測定は3次元トポロジカル絶縁体における光励起キャリアの緩和チャンネル・光電流の起源を理解する上で重要である。本論文では、テラヘルツ放射分光法・中赤外ポンプ-プローブ分光法を行うことによって、その一連のダイナミクスについて初めて明らかにした。

3次元トポロジカル絶縁体中の光電流は、キャリアの外場応答を明らかにする上で興味を持たれる一方、その発生メカニズムは未解明であった。従来の研究では、光照射によって電極間に流れる電流を時間積算していたために、時間分解能がなく、過渡応答特性の解明は大きな課題であった。本論文ではテラヘルツ放射分光法を行い、その時間応答を調べることによって、光電流が光照射に対して即時的に発生しているということを初めて明らかにした。さらに、発生したテラヘルツ光の偏光方向は励起直線偏光の結晶軸に対する向きに大きく依存して変化することを見出した。この結晶方位依存性に関する詳細な実験結果から、光電流が **photon drag** 効果によって発生していることを明らかにした。この結果は、光電流の発生メカニズムに関する非常に重要な知見を与えたという点において高く評価される。

一方、3次元トポロジカル絶縁体中における光励起非平衡キャリアのピコ秒領域でのダイナミクスは、これまで時間分解光学測定や時間・角度分解光電子分光によって精力的に研究されてきた。これらの研究においては、励起キャリア密度が $10^{19} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ と高密度であったにもかかわらず、キャリア間の多体効果についてはほとんど考慮されてこなかった。本研究では、バンドギャップ近傍の光子エネルギーのフェムト秒光源をもちい、広い励起密度条件下で光誘起反射率変化の時間発展を測定した。その結果、 10^{18} cm^{-3} を超えるキャリア密度で、反射率変化の時間応答に非線形な密度依存性が現れることを明らかにした。さらに、レート方程式を用いた解析について提案し、**Auger**再結合の寄与を含めれば、実験結果をうまく再現することを示した。モデルによる定量的解析により $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{Te}_{1.7}\text{Se}_{1.3}$ の**Auger**係数を $C = 0.4 \times 10^{-26} \text{ cm}^6 / \text{s}$ と決定した。この結果は、今後の3次元トポロジカル絶縁体の電気伝導の研究にとって重要な知見であり、高く評価される。

以上のように、本研究によって明らかになった、3次元トポロジカル絶縁体の光励起キャリアの生成から緩和に至る一連のダイナミクスについての知見は、相対論的粒子の輸送特性や外部電磁場との相互作用を明らかにする上の基礎物性として重要であるとともに、今後の当該分野における研究の発展において大きな意義を持つものである。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成27年3月5日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 2015年 6月 1日以降